

### Mémoire magnétique à détection de spin

La présente invention concerne une mémoire magnétique à détection de spin.

Les mémoires magnétiques sur silicium, encore appelées « MRAM »  
5 pour le terme anglais « Magnetic Random Access Memory » ont connu un développement très rapide ces dernières années et l'on pourra se référer à ce sujet par exemple au brevet américain US 5 650 958. Elles présentent en effet de nombreux avantages comme la non-volatilité de la mémoire « FLASH », la rapidité de la mémoire « SRAM » et la densité de la mémoire « DRAM ». Outre  
10 ces nombreux avantages, elles offrent aussi un fonctionnement à très basse tension.

Néanmoins, le procédé de fabrication des MRAM est complexe. Il nécessite un contrôle très précis de certains paramètres ainsi que l'emploi de matériaux peu répandus. Ces mémoires se révèlent ainsi difficiles à industrialiser  
15 de façon rentable et, jusqu'à présent, seuls quelques prototypes ont été produits.

Un premier type de transistor à spin tel que celui décrit dans le brevet américain US 5 654 566 se présente comme un transistor à effet de champ si ce n'est que la source, respectivement le drain, sont remplacés par un injecteur, respectivement un détecteur d'électrons polarisés en spin, tous deux en matériau  
20 magnétique aimanté.

Les électrons polarisés en spin sont injectés de l'injecteur dans le canal du transistor. Ils dérivent sous l'effet du champ électrique appliqué entre l'injecteur le détecteur. La grille sert à manipuler des spins (changer leur orientation) lors du parcours de l'injecteur au détecteur.

25 Les potentiels électriques des trois éléments, injecteur, grille et détecteur, sont conditionnés par le fonctionnement du transistor, si bien qu'il n'est pas possible de les modifier librement pour optimiser l'injection d'électrons polarisés en spin dans le canal, ni pour optimiser la détection de ces mêmes électrons.

30 On connaît par ailleurs le transistor à spin de type bipolaire tel que celui enseigné par le brevet américain US 5 962 905. Ici, l'émetteur et la base sont recouverts chacun d'une couche magnétique aimantée. Bien que ces deux éléments soient séparés par une jonction semi-conductrice, la plage de réglage de leur potentiel reste très limitée.

La présente invention a ainsi pour objet une mémoire magnétique à détection de spin dans laquelle l'injection et/ou la détection des électrons polarisés en spin sont sensiblement améliorées.

Selon l'invention, la mémoire est agencée sur une jonction semi-conductrice formée de deux zones adjacentes, la première et la deuxième zone présentant une conductivité respectivement d'un premier et d'un second type, cette mémoire comportant une première et une deuxième cellules de connexion disposées de part et d'autre de cette jonction, chaque cellule étant pourvue d'un module d'aimantation ; de plus, l'une au moins de ces cellules comporte une électrode de polarisation en sus de son module d'aimantation.

L'adjonction d'une électrode à proximité du module d'aimantation permet de modifier la polarisation de ce module sans perturber outre mesure le fonctionnement de la mémoire.

De préférence, l'un des modules d'aimantation jouxte la jonction semi-conductrice.

Selon un mode de réalisation privilégié, l'un au moins de ces modules d'aimantation comporte une couche tampon au contact de la zone dans laquelle il figure, une couche magnétique étant disposée sur cette couche tampon.

Avantageusement, cette couche tampon est en un matériau isolant et, suivant une caractéristique additionnelle, son épaisseur est telle qu'elle permette une conduction par effet tunnel entre la couche magnétique et la zone dans laquelle elle figure.

De plus, la distance entre les deux modules d'aimantation de la mémoire est inférieure au double de la longueur de diffusion de spin.

En outre, la première zone présente une conductivité de type p.

La présente invention apparaîtra maintenant avec plus de détails dans le cadre de la description qui suit d'exemples de réalisation donnés à titre illustratif en se référant à la figure annexée qui représente un schéma de la mémoire à détection de spin selon l'invention.

En référence à la figure 1, la mémoire magnétique est disposée sur un substrat semi-conducteur 100.

Le substrat 100 comporte une première zone 101 sur laquelle est disposée une première cellule de connexion 110. Cette première zone 101 présente une conductivité d'un premier type, le type p dans le cas présent, alors que le reste du substrat qui constitue une deuxième zone 102, présente une

conductivité du deuxième type, du type n dans le cas présent. La séparation des deux zones forme ainsi une jonction semi-conductrice 103.

La première cellule de connexion 110 est ici un injecteur d'électrons polarisés en spin. Elle comporte un premier module d'aimantation formé d'une  
5 première couche tampon 111 au contact de la première zone 101 et d'une première couche magnétique 112 disposée sur cette première couche tampon.

De préférence, ce premier module d'aimantation est disposé à proximité immédiate de la jonction semi-conductrice 103.

Les électrons polarisés en spin sont injectés de la première couche  
10 magnétique 112 dans la première zone 101.

Pour injecter et détecter des électrons polarisés en spin, il faut disposer de matériaux qui ont une forte polarisation électronique de spin : les matériaux ferromagnétiques sont naturellement de bons candidats. Ces matériaux peuvent être isolants, semi-conducteurs ou métalliques. Pour des dispositifs électroniques  
15 tels que les mémoires, il est préférable de recourir à des métaux ferromagnétiques car les semi-conducteurs ferromagnétiques sont des matériaux qui ont été synthétisés récemment et leur technologie n'est pas encore bien maîtrisée. De plus, la température de Curie de ces matériaux est assez basse, inférieure à 300°K, et ces matériaux ne peuvent donc pas être utilisés à  
20 température ambiante. Par contre, les matériaux ferromagnétiques conducteurs ont des températures de Curie très élevées, largement supérieures à 300°K. Leur technologie est bien maîtrisée et il existe une large gamme de métaux ferromagnétiques (purs et alliages) avec des propriétés magnétiques (champ coercitif, anisotropie magnétiques...) variées.

L'injection d'électrons à partir de métaux ferromagnétiques peut se faire de différentes manières, notamment au moyen d'une jonction tunnel. En effet, des expériences réalisées avec des métaux ferromagnétiques montrent que les électrons émis par ces métaux à travers des jonctions tunnels sont fortement polarisés en spin.

30 Ainsi, de préférence, la première couche tampon 111 est en un matériau isolant tel que le dioxyde de silicium ou l'alumine.

Elle présente une épaisseur suffisamment fine, d'une fraction de nanomètre à quelques nanomètres, pour que la conduction entre la première couche magnétique 112 et la première zone 101 soit dominée par l'effet tunnel.

35 L'empilement première zone 101, première couche tampon 111, première couche magnétique 112, constitue donc une jonction tunnel.

De sorte que cette jonction tunnel puisse être polarisée en direct, la première cellule d'aimantation comporte une électrode de polarisation 113 en contact ohmique avec la première zone 101. Il suffit qu'une tension relativement faible, de l'ordre de quelques Volts, soit appliquée entre la première couche magnétique 112 et la première zone 101 pour décourber les bandes dans le semi-conducteur 101 à proximité de l'interface avec la première couche tampon 111. L'injection d'électrons dans la bande de conduction de ce semi-conducteur est alors assurée.

D'autre part une deuxième cellule de connexion 120 joue le rôle de détecteur d'électrons polarisés en spin. Disposée sur la deuxième zone 102, elle comporte un deuxième module d'aimantation qui, de préférence, est formée d'une deuxième couche tampon 121 au contact de la deuxième zone 102 et d'une deuxième couche magnétique 122 disposée sur cette deuxième couche tampon.

On a mentionné plus haut qu'une jonction tunnel permet d'accroître sensiblement l'efficacité d'injection des électrons polarisés. Une telle jonction permet de manière analogue d'améliorer la détection de ces électrons polarisés car la probabilité de passage d'un électron dans un matériau ferromagnétique à travers cette jonction dépend très fortement de son orientation de spin.

Ainsi, avantageusement, la deuxième couche tampon 121 est en matériau isolant pour réaliser une deuxième jonction tunnel matérialisée par l'empilement deuxième zone 102, deuxième couche tampon 121, deuxième couche magnétique 122.

Pour améliorer la sélectivité en spin de la détection, il est préférable de disposer une seconde électrode de polarisation 123 en contact ohmique avec la deuxième zone 102. A titre d'exemple, la différence de potentiel entre la deuxième couche magnétique 122 et cette deuxième électrode de polarisation est de l'ordre de quelques Volts.

Le courant injecté par la première cellule de connexion 110 à destination de la deuxième cellule de connexion est polarisé en spin. Autrement dit, il est constitué majoritairement d'électrons d'un type de spin, « spin up » ou « spin down ». Le taux de polarisation du courant est déterminé par la structure de bandes du matériau magnétique à l'interface avec la couche tampon. La polarisation de spin dépend de l'orientation de l'aimantation du métal ferromagnétique. Le courant injecté  $I$  a deux composantes  $G_+$  et  $G_-$ , chacune

représentant le courant d'électron respectivement de « spin up » ou de « spin down ».

Au niveau de la deuxième cellule de connexion, le courant injecté est subdivisé en un courant de détection capté par la deuxième couche magnétique 122 et un courant de fuite capté par la deuxième électrode de polarisation 123. Le courant de détection et le courant de fuite dépendent de l'aimantation relative des deux modules d'aimantation.

On note  $i_p$ , respectivement  $i_{ap}$ , le courant de détection lorsque les aimantations des deux modules sont parallèles, respectivement antiparallèles. On note de même  $j_p$ , respectivement  $j_{ap}$ , le courant de fuite lorsque les aimantations des deux modules sont parallèles, respectivement antiparallèles.

Les probabilités de transmission des électrons de « spin up » et de « spin down » dans la deuxième couche magnétique sont caractérisées par les coefficients  $\alpha_+$  et  $\alpha_-$ , la probabilité de passer vers le contact ohmique étant caractérisée par le coefficient  $\beta$  qui lui est indépendant de la polarisation de spin.

En configuration parallèle, les différents courants sont reliés aux concentrations  $n_+$  et  $n_-$  d'électrons respectivement de « spin up » et de « spin down » comme suit :

$$I = G_+ + G_- ; i_p = \alpha_+ n_+ + \alpha_- n_- ; j_p = \beta(n_+ + n_-)$$

En régime stationnaire et toujours pour une configuration parallèle des aimantations relatives des injecteurs et détecteurs nous avons :

$$G_+ = \alpha_+ n_+ + \beta n_+ ; G_- = \alpha_- n_- + \beta n_-$$

$$n_+ = \frac{G_+}{\alpha_+ + \beta} ; n_- = \frac{G_-}{\alpha_- + \beta}$$

$$i_p = \alpha_+ n_+ + \alpha_- n_- = \frac{\alpha_+}{\alpha_+ + \beta} G_+ + \frac{\alpha_-}{\alpha_- + \beta} G_-$$

Lorsque les aimantations de l'injecteur et du détecteur sont en configuration antiparallèles, le courant détecté est modifié par rapport à la configuration parallèle :

$$G_- = \alpha_+ n_+ + \beta n_- ; \quad G_+ = \alpha_- n_- + \beta n_+$$

$$n_- = \frac{G_+}{\alpha_- + \beta} ; \quad n_+ = \frac{G_-}{\alpha_+ + \beta}$$

$$i_{ap} = \alpha_+ n_+ + \alpha_- n_- = \frac{\alpha_+}{\alpha_+ + \beta} G_- + \frac{\alpha_-}{\alpha_- + \beta} G_+$$

5

Il s'ensuit que :

$$i_p - i_{ap} = \frac{\alpha_+}{\alpha_+ + \beta} (G_+ - G_-) - \frac{\alpha_-}{\alpha_- + \beta} (G_+ - G_-)$$

$$i_p - i_{ap} = (G_+ - G_-) \left( \frac{\beta(\alpha_+ - \alpha_-)}{(\alpha_+ + \beta)(\alpha_- + \beta)} \right)$$

10

$$i_p + i_{ap} = \frac{\alpha_+}{\alpha_+ + \beta} (G_+ + G_-) + \frac{\alpha_-}{\alpha_- + \beta} (G_+ + G_-) \quad \text{S}$$

$$i_p + i_{ap} = (G_+ + G_-) \frac{2\alpha_+ \alpha_- + \beta(\alpha_+ + \alpha_-)}{(\alpha_+ + \beta)(\alpha_- + \beta)}$$

15

Nous introduisons les notations suivantes pour quantifier les asymétries du courant injecté, de la détection et du courant détecté :

$$G_+ = G + \Delta G ; G_- = G - \Delta G ; \text{ où } G = \frac{(G_+ + G_-)}{2} \text{ et } \Delta G = \frac{(G_+ - G_-)}{2}$$

20

$$\alpha_+ = \alpha + \Delta\alpha; \alpha_- = \alpha - \Delta\alpha; \text{ où } \alpha = \frac{(\alpha_+ + \alpha_-)}{2} \text{ et } \Delta\alpha = \frac{(\alpha_+ - \alpha_-)}{2}$$

$$i = \frac{(i_p + i_{ap})}{2} \text{ et } \Delta i = \frac{(i_p - i_{ap})}{2}$$

La quantité qui caractérise la sensibilité du détecteur est  $\Delta i/i$ , variation relative du courant de détection pour deux configurations d'aimantation :

$$\frac{\Delta i}{i} = \frac{\Delta G}{G} \times \frac{2\beta\Delta\alpha}{2[\alpha^2 - (\Delta\alpha)^2] + 2\beta\alpha} = \frac{\Delta G}{G} \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \frac{\beta}{\alpha \left[ 1 - \left( \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \right)^2 + \frac{\beta}{\alpha} \right]}$$

En faisant l'hypothèse que  $(\Delta\alpha)^2$  est sensiblement inférieur à  $\alpha^2$ , nous obtenons la relation suivante :

$$\frac{\Delta i}{i} \approx \frac{\Delta G}{G} \times \frac{\Delta\alpha}{\alpha} \times \frac{\beta}{\alpha + \beta};$$

$\Delta G/G$  caractérise la polarisation de spin des électrons injectés.

$\Delta\alpha/\alpha$  caractérise l'anisotropie de transmission du détecteur.

Les rapports  $\Delta G/G$  et  $\Delta\alpha/\alpha$  valent quelques dixièmes d'unité, 0,4 environ pour un alliage de fer et de cobalt.

La limite de sensibilité dépend donc uniquement des propriétés des structures ferromagnétiques. Elle est atteinte pour  $\alpha \ll \beta$  ou encore pour  $i \ll j$ . Le détecteur présente donc un courant plus faible (par rapport au courant injecté), mais avec une sensibilité maximale à la polarisation de spin dans le semi-conducteur. Pour un courant détecté représentant 10% du courant injecté, la sensibilité du détecteur sera égale à 90% de la sensibilité limite, donnée par le choix des matériaux ferromagnétiques.

En qualifiant de collecteur l'espace figurant entre les deux modules d'aimantation, ce collecteur contient une concentration non négligeable d'électrons non polarisés de spin lorsque le courant injecté est nul. Au fur et à mesure que des électrons polarisés en spin sont injectés, ces électrons

remplacent progressivement les électrons non polarisés. Dans le collecteur en régime stationnaire, une distribution de polarisation de spin  $P$  s'établit qui a la forme suivante :

$$P(x) = P(0) \exp(-x/L_s)$$

- 5 où  $x$  est la distance de l'électron à la jonction semiconductrice 103 et  $L_s$  la longueur de diffusion de spin.

$$L_s = \sqrt{D\tau_s}$$

- 10 avec  $D$  le coefficient de diffusion des électrons et  $\tau_s$  le temps de relaxation de spin.

Il est donc préférable que la distance  $d$  qui sépare les deux modules d'aimantation soit inférieure à la longueur de diffusion  $L_s$ , bien que cette distance  $d$  puisse être plus importante, le double de la longueur de diffusion  $L_s$  par exemple, ceci au détriment de la sensibilité du détecteur.

- 15 Dans le silicium à température ambiante, le coefficient de diffusion des porteurs et le temps de relaxation de spin sont suffisamment élevés pour que les électrons conservent leur spin sur des longueurs de diffusion de plusieurs microns. Les temps de relaxation de spins d'électrons de conduction, mesurés par les techniques dites « RPE » (pour Résonance Paramagnétique  
20 Electronique), sont de l'ordre de  $10^{-8}$  s. Ceci conduit à une valeur de  $L_s$ , la longueur de diffusion, de l'ordre de quelques microns. Pour des distances  $d$  inférieures à  $L_s$ , la relaxation de spin est donc un phénomène négligeable et le spin devient une caractéristique propre à chaque électron.

- La mémoire selon l'invention peut notamment être fabriquée de la façon  
25 suivante. Le procédé jusqu'à la partie contact est un procédé de fabrication CMOS traditionnel. Avant l'ouverture des contacts ou après le remplissage du contact par un métal, une étape supplémentaire est introduite. Un isolant de quelques nanomètres d'épaisseur est déposé ; cet isolant peut être du dioxyde de silicium, de l'alumine ou tout autre diélectrique connu. Ensuite est réalisé le  
30 dépôt du matériau ferromagnétique, un alliage de cobalt et de fer par exemple. Les deux contraintes imposées aux matériaux sont d'avoir une interface abrupte avec le diélectrique tout en maintenant une polarisation électronique élevée à l'interface. L'épaisseur de matériau magnétique déposée peut varier de quelques dizaines à quelques centaines de nanomètres. Ensuite est réalisé le dépôt d'un  
35 ~~métal~~ traditionnel comme du cuivre ou de l'aluminium, ou tout autre matériau



assurant une bonne continuité électrique. Le circuit est alors polli mécano-chimiquement afin de laisser uniquement le matériau magnétique dans les zones d'injection et de détection. Le procédé peut alors reprendre son cours traditionnel.

5 La mémoire est écrite ou effacée avec un champ magnétique qui vient retourner l'aimantation de la première 112 ou de la deuxième 122 couche magnétique. Du fait que le courant passant dans le détecteur dépend de l'orientation relative des aimantations des injecteurs et détecteurs, l'état magnétique de la cellule est lu avec le courant traversant le détecteur. Comme  
10 dans l'état de l'art, l'écriture de la mémoire peut être accomplie par le passage d'un courant à travers deux conducteurs métalliques isolés qui se croisent au-dessus de la couche magnétique qu'il s'agit d'aimanter.

Quand un courant de saturation traverse ces deux conducteurs, le champ magnétique généré à l'intersection de ceux-ci est suffisant pour faire  
15 passer les configurations d'aimantation d'un état parallèle à un état antiparallèle. Le courant de saturation est choisi de sorte que le champ magnétique combiné excède le champ critique du métal ferromagnétique, déterminé de manière prépondérante par l'anisotropie magnétique. De plus, si ce courant de saturation est appliqué à un seul des deux conducteurs, le champ magnétique généré est  
20 insuffisant pour retourner l'aimantation. Finalement, l'agencement des conducteurs est tel que le champ généré par le courant de saturation est très localisé. Ce champ est inférieur au champ nécessaire pour modifier l'aimantation d'autres éléments magnétiques qui seraient situés à proximité de l'intersection des deux conducteurs.

25 Les deux directions possibles d'aimantation définissent alors deux états logiques possibles (couramment notés 0 ou 1) de la mémoire.

Naturellement, plusieurs mémoires individuelles ou unités telles que celle décrite ci-dessus peuvent être associées pour réaliser un ensemble de mémorisation.

30 La structure de cette unité lui permet d'être intégrée avec des composants élémentaires tels des transistors, diodes ou capacités. Ces composants permettent de manipuler le courant de lecture à travers les différentes unités et ainsi de conduire à un ensemble de mémorisation à accès aléatoire (« RAM »).

35 Actuellement, l'ensemble des mémoires non volatiles (« EEPROM », « FLASH », « FeRAM », « MRAM ») utilisent des procédés de fabrication qui ne

sont pas standards. La fabrication nécessite l'ajout de quatre à cinq niveaux de masquages, d'où un surcoût d'environ 20%.

Selon l'invention, il devient possible de fabriquer des mémoires non volatiles avec un procédé CMOS conventionnel, sans augmenter  
5 considérablement les différents niveaux de masquage. En outre, par comparaison aux mémoires « Flash », la mémoire selon l'invention fonctionne à basse tension et ne nécessite pas de pompe de charges. Il s'agit là d'un avantage déterminant pour les applications mobiles.

L'invention est particulièrement adaptée à la technologie dite « System  
10 On Chip » ou « SOC ». La technologie SOC intègre l'ensemble des composants sur une puce unique : micro-contrôleur, mémoires « SRAM » et « DRAM », logique dédiée, « MEMS », senseurs chimiques et bien sûr, mémoires non-volatiles. Il est alors nécessaire d'avoir un procédé de fabrication le plus standardisé possible.

15 L'exemple de réalisation de l'invention présenté ci-dessus a été choisi pour son caractère concret. Il ne serait cependant pas possible de répertorier de manière exhaustive tous les modes de réalisation que recouvre cette invention. En particulier, tout moyen décrit peut-être remplacé par un moyen équivalent sans sortir du cadre de la présente invention.

## REVENDEICATIONS

- 1) Mémoire magnétique à détection de spin agencée sur une jonction semi-conductrice 103 formée de deux zones adjacentes, la première 101 et la deuxième 102 zone présentant une conductivité respectivement d'un premier et d'un second type, comportant une première 110 et une deuxième 120 cellules de connexion disposées de part et d'autre de ladite jonction 103, chaque cellule étant pourvue d'un module d'aimantation 111-112, 121-122, caractérisée en ce que l'une au moins de ces cellules comporte une électrode de polarisation 113, 123 en sus dudit module d'aimantation.
- 2) Mémoire selon la revendication 1, caractérisée en ce que l'un desdits modules d'aimantation 111-112 jouxte ladite jonction.
- 3) Mémoire selon l'une quelconque des revendications 1 ou 2, caractérisée en ce que l'un au moins desdits modules d'aimantation comporte une couche tampon 111, au contact de ladite zone 101, une couche magnétique 112 étant disposée sur cette couche tampon.
- 4) Mémoire selon la revendication 3, caractérisée en ce que ladite couche tampon 111 est en un matériau isolant.
- 5) Mémoire selon la revendication 4, caractérisée en ce que l'épaisseur de ladite couche tampon 111 est telle qu'elle permette une conduction par effet tunnel entre ladite couche d'aimantation et ladite zone.
- 6) Mémoire selon l'une quelconque des revendications précédentes, caractérisée en ce que la distance entre les deux modules d'aimantation 111-112, 121-122 est inférieure au double de la longueur de diffusion de spin.
- 7) Mémoire selon l'une quelconque des revendications précédentes caractérisée en ce que ladite première zone 101 présente une conductivité de type p.

